

Evaluación de un hormigón autocompactante sometido a ciclos de hielo-deshielo mediante ensayos no destructivos

B. Olivares, H.L. Romero, J.C. Gálvez

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

M.J. Casati

Departamento de Vehículos Aeroespaciales, E.U.I.T Aeronáutica, Universidad
Politécnica de Madrid, España.

RESUMEN

Los daños asociados a los ciclos hielo-deshielo en estructuras de hormigón y sobre todo cuando se usan sales fundentes, son evidentes en una inspección, en muchos casos en ese momento, el daño ya es relativamente grande y se requiere una intervención importante. El uso de técnicas no destructivas que puedan anticipar el daño antes de que fuera detectable mediante inspección, permitiría poder acometer operaciones de mantenimiento con un menor coste.

En este trabajo se monitoriza mediante técnicas no destructivas tres hormigones: uno convencional, con y sin aireante, y otro autocompactante frente a ciclos de hielo/deshielo, sometiendo probetas al ensayo de resistencia al hielo-deshielo de acuerdo a la norma UNE-CEN/TS 12390-9 (medida de pérdida de masa superficial). En paralelo a las medidas de descascarillamiento superficial se realizaron medidas de velocidad de pulso ultrasónico, para establecer la variación del módulo de elasticidad dinámico del material. También se realizaron mediciones en continuo, durante todos los ciclos, de deformación superficial del hormigón utilizando bandas extensométricas y sensores de fibra óptica.

Los resultados obtenidos del ensayo de hielo-deshielo muestran, como cabía esperar, un mayor deterioro en el hormigón de referencia sin aireante. Los hormigones eran de resistencias características similares, con el mismo contenido de cemento, igual relación agua/cemento, si bien el hormigón autocompactante tenía una mayor cantidad de finos (filler calizo) con el consiguiente refinamiento de la red porosa.

De los resultados obtenidos, se determinó por un lado la viabilidad del uso de ensayos no destructivos, con posible implementación in situ, para determinar el daño del hormigón autocompactante y por otro la posibilidad de utilizar estas medidas de la deformación en el ensayo de hielo-deshielo en laboratorio con la ventaja de no tener que parar el ensayo para realizar las medidas de descascarillamiento de las probetas.

PALABRAS CLAVE: Hielo-deshielo, Durabilidad, Ensayos no destructivos END.

1.- INTRODUCCIÓN

El efecto de los ciclos de hielo-deshielo (CHD) sobre el hormigón convencional (HC) es un fenómeno complejo estudiado desde hace años, pero que aun no ha sido completamente explicado. El trabajo de algunos investigadores [1-5] ha permitido establecer las principales teorías sobre los mecanismos de congelamiento, referidas a los movimientos de las soluciones contenidas en los poros y su cambio de estado con los CHD, produciendo la expansión y la contracción del material [6]. Pero son pocos los estudios que se pueden encontrar sobre este fenómeno para los hormigones autocompactantes (HAC).

Según el Anejo 17 de la EHE, el comportamiento de un HAC frente a los ciclos de hielo-deshielo es similar al del HC, debiendo introducir un contenido mínimo de aire ocluido del 4,5% del volumen de hormigón. Las precauciones que habrá que tomar son las relaciones con la compatibilidad entre el aditivo aireante y el empleo del superplastificante (u otro aditivo) en el HAC.

Actualmente existen varios mecanismos razonados que explican el comportamiento del hormigón frente a CHD, pero ninguno de ellos puede explicar totalmente el fenómeno. Las hipótesis principales que explican este proceso se basan en que el agua existente dentro del hormigón se expande un 9 % al congelarse, y al no existir espacio disponible dentro del hormigón para expandirse, genera unas tracciones en la red capilar que pueden llegar a fisurar y romper el material. Siguiendo este razonamiento, únicamente un hormigón con saturación del 91,7 % sufriría el efecto de la helada, pero puede comprobarse que hasta los hormigones con un grado de saturación del 80 % sufren deterioro por este fenómeno.

Varios estudios publicados revelan que el hormigón autocompactante resiste muy bien los CHD [7-9]. Otros autores estudiaron el efecto de los CHD en diferentes mezclas de HAC para comparar el efecto de las adiciones [10]. Por otra parte se han obtenido buenas resistencias a los CHD cuanto más fino es el filler pero con mayor descascarillamiento si se usan sales de deshielo [11].

Según Wallevik y Nielsson [12] comparando el HAC y el hormigón convencional, se observa que hay muy poca diferencia en la pérdida de material debido a los ciclos de hielo-deshielo. Por otra parte, cuanto menor es la relación agua/cemento, mejor resistencia tendrá el hormigón frente a CHD con sales de deshielo.

La mayoría de los ensayos acelerados que determinan la resistencia del hormigón al hielo-deshielo miden el descascarillamiento de las probetas por medio de la pérdida de masa. Este procedimiento es sencillo y fácil de ejecutar, pero presenta algunos inconvenientes. El ensayo debe detenerse para realizar las mediciones de pérdida de peso y el deterioro sólo es detectado cuando hay un descascarillamiento apreciable.

Este trabajo propone evaluar el deterioro mediante la lectura del incremento de la deformación con galgas extensométricas y fibra óptica. Estos procedimientos permiten monitorizar en continuo el deterioro, sin detener el ensayo para realizar las medidas, así como detectarlo antes que con el procedimiento tradicional.

2.- DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La campaña experimental realizada en esta investigación para el estudio del comportamiento ante los CHD comprende la fabricación de tres hormigones: hormigón autocompactante (HAC), hormigón convencional con aireante (C/A) y otro sin aireante (S/A). Se realizó un seguimiento tanto de deformaciones internas en el hormigón (microfisuras) mediante la lectura de la velocidad ultrasónica como del deterioro externo mediante el desprendimiento de material (descascarillamiento) y la lectura de la deformación por medio de bandas extensométricas y fibra óptica.

2.1.- Preparación de las probetas

Se fabricaron tres tipos de hormigones, uno autocompactante con filler calizo y uno convencional (sin aire ocluido) y otro con aire ocluido, todos con similar resistencia característica. El cemento empleado ha sido CEM I 42,5 R. La arena silícea de río (0-5 mm) de módulo granulométrico 4,69. El árido calizo de machaqueo de 4-8 mm y de 6-12 mm, con índices granulométricos 7,98 y 7,07 respectivamente. Se añadió un superplastificante (Viscocrete 5720) suministrado por SIKA para mejorar la trabajabilidad. Se empleó para la generación de aire ocluido una adición de un aireante (Sika Aer 5), en proporción 0,05% en peso del cemento. El filler calizo suministrado por HOLCIM provenía de Jerez. Las dosificaciones empleadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificaciones de los hormigones por m3 de mezcla

<i>Dosificaciones</i>	<i>Hormigón autocompactante (HAC)</i>	<i>Hormigón con aireante (C/A)</i>	<i>Hormigón sin aireante (S/A)</i>
Cemento (kg)	360	450	360
Filler Calizo (kg)	220	-	-
Arena de río (kg)	928	963	963
Grava Gruesa (kg)	310	350	389
Grava fina (kg)	408	438	500
Superplastificante (%)	0,30	0,10	0,10
A/C	0,50	0,43	0,45
Aireante (%)		0,45	

Los ensayos del hormigón autocompactante en estado fresco proporcionaron los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados ensayos de hormigón fresco en HAC

<i>Ensayo</i>	
Escurrimiento: Tiempo	2 seg
Escurrimiento: Diámetro	700 mm
Embudo en V: Tiempo	8 seg
Caja en L: C _{bl}	0,85

Evaluación hormigón autocompactante sometido ciclos H/D mediante END

El hormigón sin aireante resultó de consistencia plástica (3 cm) y el de aireante de consistencia fluida (17 cm).

El contenido de aire ocluido de los hormigones medido mediante el ensayo UNE-EN_12350-7 se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la medida de aire ocluido

Hormigón	%
Autocompactante	2,5
Sin aire ocluido	4
Con aire ocluido	10

La Tabla 4 muestra los resultados de resistencia a compresión a 28 días de los tres hormigones.

Tabla 4. Resultados de resistencia a compresión

Hormigón	MPa
Autocompactante	48,9
Sin aire ocluido	45,3
Con aire ocluido	32,6

2.2.- Procedimiento de ensayo

Las probetas de hormigón utilizadas para el ensayo de resistencia frente a CHD corresponden a la mitad de un cubo con área superficial de $150 \times 150 \text{ mm}^2$ y de 70 mm de altura. Se confeccionaron cinco probetas de cada mezcla y se ensayaron de acuerdo con la norma UNE-CENT/TS 12390-9 Ensayo CDF (Método alternativo) [7]. Terminada la preparación especial establecida en la norma para las probetas: curado, secado y saturación; a los 35 días de edad, se colocaron en una cámara climática y se sometieron a 42 CHD (número de ciclos recomendados en la normativa 28), variando la temperatura entre 20°C y -20°C en 12 horas, de acuerdo con la curva de temperatura-tiempo mostrada en la Figura 1.

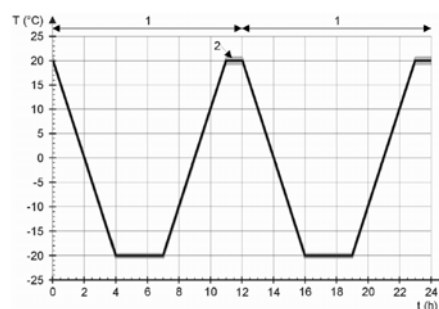


Figura 1. Curva de temperatura para los ciclos hielo-deshielo

La Figura 2 muestra las probetas de hormigón en el interior de la cámara climática. El ensayo de resistencia al hielo-deshielo fue realizado utilizando una solución de NaCl al 3% como medio de congelación. La pérdida de masa de la superficie en contacto con la

solución de cada probeta fue medida después de 4, 6, 14, 28 y 42 ciclos. Para realizar las mediciones se retiraron las partículas adheridas de las superficies de las probetas mediante tratamiento en baño ultrasónico. Posteriormente se filtró la disolución conteniendo el material desprendido y se secó durante 24 h a 100 °C. El material se pesó después de alcanzar la temperatura ambiente.



Figura 2. Probetas de hormigón durante el ensayo

2.3.- Medida del deterioro con galgas extensométricas, fibra óptica y velocidad ultrasónica

Las probetas se monitorizaron por medio de sensores conectados a ordenadores para el registro continuo de los datos durante todos los CHD.

La deformación superficial en cada probeta de hormigón se midió usando bandas extensométricas comerciales adheridas en el centro de la probeta en una de las caras y mediante sensores de fibra óptica de poliamida también centradas en la cara posterior de la misma probeta. La posición de ambos sensores se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Colocación de las bandas extensométricas y la fibra óptica

Simultáneamente a la toma de medida del material desprendido se realizó la medida de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) a través del hormigón y tiempo de paso de la onda ultrasónica mediante dos transductores (emisor y receptor) por un equipo de ultrasonidos portátil siguiendo la norma RILEM TC 176-IDC para la medición del daño interno en hormigones debido a la acción del hielo. (Figura 4).

Evaluación hormigón autocompactante sometido ciclos H/D mediante END



Figura 4. Medida con ultrasonidos

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Pérdida de masa superficial

Los resultados de la pérdida de masa superficial se muestran en la Figura 5. Las probetas del hormigón HAC y S/A se deterioraron antes de los 28 CHD, con una masa acumulada de material desprendido promedio de $1,5 \text{ kg/m}^2$ (valor máximo recomendado por la norma [13]) en el ciclo 14 para el HAC y en el 19 para el S/A y un total de $8,37$ y $3,22 \text{ kg/m}^2$ después del ciclo 28 respectivamente. Por el contrario, en las probetas del hormigón C/A, el descascarillamiento acumulado después de los 28 ciclos fue de $0,04$ y a los 42 ciclos fue de solo $0,05 \text{ kg/m}^2$.

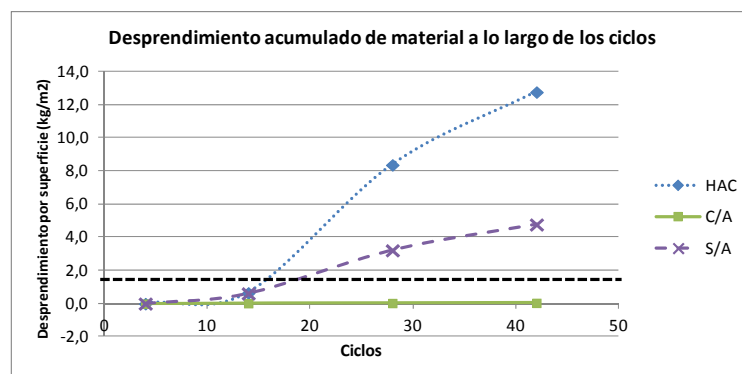


Figura 5. Desprendimiento del material por unidad de superficie

En la Figura 6 se muestra las superficies de ensayo en contacto con el medio de congelación de una probeta de cada hormigón después de los 28 ciclos.

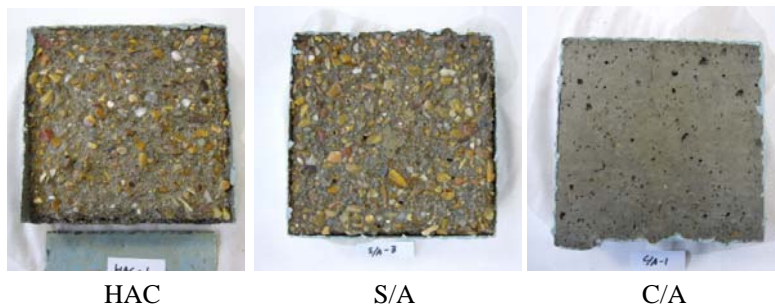


Figura 6. Aspecto de los hormigones tras de 28 ciclos hielo-deshielo

3.2.- Deterioro externo determinado por las medidas de deformación

La Figura 7 muestra el módulo de elasticidad dinámico relativo (RDME) de los tres hormigones ensayados, realizada la medición al inicio y tras 4, 14, 28 y 42 ciclos. El RDME fue calculado con los datos de la velocidad recogidos por los ultrasonidos.

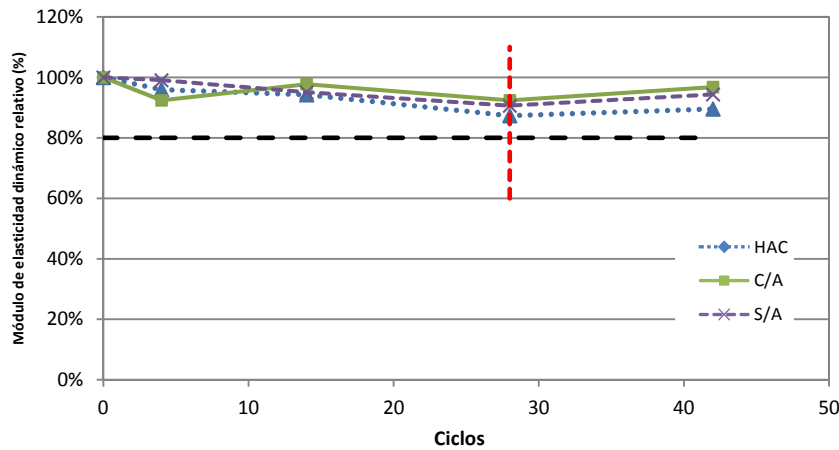


Figura 7. Variación del módulo de elasticidad dinámico relativo durante los CHD

Según la norma RILEM empleada, un hormigón se considera dañado cuando el módulo de elasticidad dinámico relativo cae por debajo del 80%, según este criterio ninguno de los hormigones aparece dañado. Se hace notar que pese al gran deterioro superficial que ha sufrido el HAC, como se aprecia en la Figura 6, su disminución del módulo elástico no llega al 80%. Estos datos dan a entender que pese al gran deterioro sufrido el HAC sigue teniendo un alto módulo elástico. Como era de esperar el material menos influenciado por los ciclos ha sido el hormigón C/A, que gracias al aire ocluido mejora su resistencia ante los ciclos.

Podemos afirmar que el desprendimiento de material es mayor en el HAC que en el hormigón de referencia con y sin aireante, pero que pese a esto el módulo elástico del HAC no se ve seriamente afectado.

La Figura 7 muestra la deformación medida con las bandas extensométricas y con fibra óptica en el hormigón C/A y en el HAC. Se aprecia cómo las medidas tomadas con ambos procedimientos están relacionadas, teniendo la temperatura una influencia menor en la amplitud de la medida con las bandas extensométricas. Ambas medidas muestran una buena correlación con la medida de material desprendido, incluso se aprecia un aumento en la deformación en el HAC antes de que comience el desprendimiento de material, en torno al ciclo 6.

Evaluación hormigón autocompactante sometido ciclos H/D mediante END

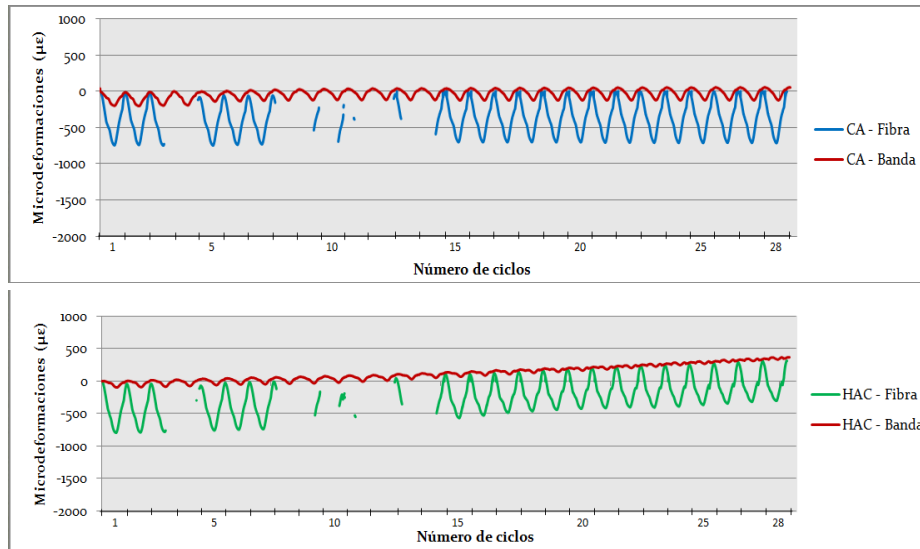


Figura 7. Comparación entre las medidas con bandas extensométricas y fibra óptica

4.- CONCLUSIONES

Se ha estudiado la evolución del deterioro de distintos hormigones bajo la acción de CHD acelerados mediante la medida del material desprendido y utilizando medidas no destructivas sobre las probetas sometidas al ensayo normalizado UNE-CEN/TS 12390-9-EX. Las medidas no destructivas comprenden: medición de ultrasonidos e instrumentación con bandas extensométricas y fibras ópticas.

Tras la investigación realizada se han extraído las siguientes conclusiones:

1. El hormigón con aireante (C/A), como cabía esperar es el que ha tenido un mejor comportamiento ante los ciclos, resultando apenas deteriorado en comparación con los demás hormigones. El siguiente hormigón con mejor comportamiento fue el hormigón de referencia (S/A), el hormigón más perjudicado ha sido el autocompactante (HAC). Correspondiendo este último al de menor contenido de aire ocluido (2,5%).
2. El hormigón con aireante (C/A) ha demostrado una alta resistencia ante los ciclos, debido a su baja relación a/c (0,43) y la incorporación de aditivo aireante.
3. El hormigón autocompactante (HAC) ha demostrado una resistencia a los ciclos incluso peor que el hormigón S/A, la cual debería haber sido similar a la de este último. Tras la discusión de resultados todo apunta a una deficiencia en el hormigonado de las probetas pese a superar con éxito los ensayos relativos al HAC en estado fresco. Esta hipótesis se refuerza por los resultados con ultrasonidos, donde pese al gran deterioro sigue poseyendo un alto módulo elástico dinámico relativo. Lo que significa que en realidad resistió bien los ciclos, pero que perdió

mucho material en zonas concretas. Estas zonas son las cercanas a la cara expuesta al ambiente durante al hormigonado de las probetas.

4. Los resultados obtenidos con las bandas extensométricas concuerdan con los extraídos del ensayo de hielo-deshielo, teniendo una mayor deformación el HAC, seguido del S/A, y obteniendo una deformación apenas apreciable en el hormigón C/A.
5. En cuanto a la fibra óptica destacamos antes de nada que debido al deterioro de la superficie instrumentada la fibra óptica se despegó en la mayoría de las probetas, quedado solo instrumentados tras los 28 ciclos el HAC y el C/A. En estos se puede ver que las deformaciones son muy superiores en el HAC que en el C/A, el cual apenas se deformó.
6. La comparación entre los resultados con fibra óptica y bandas extensométricas muestra que ambas técnicas son válidas para la evaluación del deterioro frente a los ciclos, siempre y cuando se asegure la buena adherencia de las mismas.
7. Las medidas de deformación se corresponden con las de pérdida de masa del ensayo H-D, por lo que se recomiendan como una alternativa viable de medida del ensayo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la concesión del proyecto PDI2011-24876 e IPT-42000-2010-31.

REFERENCIAS

- [1] POWERS T. - The air requirement of frost-resistance concrete. Proceedings of Highway Research Board 29, 1949. 184p.
- [2] POWERS T. - HELMUTH R. Theory of volume changes in hardened portland cement pastes during freezing. Proceedings of Highway Research Board 32, 1953. 285 p.
- [3] LITVAN C. - Phase transitions of absorbates: IV. mechanism of frost action in hardened cement paste. Journal of the American Ceramic Society, 1971. 55-38 p.
- [4] FAGERLUND G. - The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Materials and Structures 10(4), 1977. 231 p.
- [5] SETZER MJ. - Micro-ice-lens formation in porous solid. Journal Colloid Interface Sci 11/1 243(1), 2001. 193-201p.
- [6] PIGEON M, PLEU R. - Durability of concrete in cold climates. First Edition ed. Great Britain, 1995.

Evaluación hormigón autocompactante sometido ciclos H/D mediante END

- [7] HAYAKAWA, M., MATSUOKA, SHINDOH, T. - Development and Application of Super- Workable Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, E & FN Spon, London, UK, 1994. 183-190p.
- [8] PERSSON, B. - Internal Frost Resistance and Salt Frost Resistance of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 33(3), 2003. 373-379p.
- [9] TRÄGÅRDH, J., SKOGLUND P., WESTERHOLM M., - Frost Resistance, Chloride Transport and Related Microstructure of Field Self-Compacting Concrete, Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium, On Self-compacting Concrete RILEM, France, 2003. 881-891p.
- [10] YAZÝCÝ, H., - The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 22 (4), 2008. 456-462p.
- [11] HEIRMAN, G., VANDEWALLE, L. - The influence of fillers on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened state. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003. 606 – 618p.
- [12] WALLEVIK, O., NIELSSON I., - Self Compacting Concrete. Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium. 2003
- [13] UNE-CEN/TS 12390-9 EX. - Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9. Resistencia al hielo-deshielo, pérdida de masa superficial, 2008. AENOR. Madrid.